

Proposición de un modelo de predicción de retracción hidráulica por secado para hormigones chilenos

Drying shrinkage prediction model for chilean concretes

Carlos Videla*, Carlos Aguilar**

* Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE

** Departamento de Estudio de Proyectos Socovesa Ingeniería y Construcciones S.A., Santiago, CHILE
caguilar@socovesa.cl

Fecha de recepción: 01/ 06/ 2005
Fecha de aceptación: 15/ 07/ 2005
PAG. 139 - 152

Resumen

La presente investigación tuvo por objetivo desarrollar un procedimiento de predicción de la retracción hidráulica aplicable a hormigones chilenos para ser utilizado en la etapa de diseño de proyectos. Se analizaron diferentes tipos de hormigón variando el asentamiento de cono, tipos de cemento y de áridos, tamaños máximos nominales de áridos y diferentes tipos de aditivos, así como también el distintas razones entre el volumen y la superficie expuesta de los especímenes de hormigón. Se estudio un total de 82 tipos de hormigón con resistencias cilíndricas entre 25 y 40 MPa obtenidas a los 28 días, involucrando 492 especímenes de diferentes dimensiones. Se midió la retracción hasta los 1350 días de secado con un periodo de curado húmedo de 7 días. La aplicabilidad de diferentes modelos de predicción propuestos en la literatura es analizada basándose en las retracciones obtenidas por ensayo. Se concluye que ninguno de los modelos de predicción de retracción representa adecuadamente el comportamiento observado de los hormigones fabricados. Se desarrolló un modelo de predicción de retracción para ser utilizado en hormigones con características similares a los analizados en la presente investigación.

Palabras Clave: Retracción hidráulica, modelos de predicción, cemento Portland, cemento Portland Puzolánico, aditivos

Abstract

The present research aims to develop an updating procedure of drying shrinkage prediction models for Chilean concrete made with different materials for using in design phase. The proposed methodology considers the comparison of measured and predicted shrinkage values and the calibration of current proposed models. The effect of the specimen volume surface ratio slump, aggregate and cement type, maximum size aggregate and admixture types were analyzed. A total of 82 different concrete mixes with a mean cylinder compressive strength at 28 day between 25 and 40 MPa were studied, involving 492 test specimens of different dimensions. The evolution of the drying shrinkage strains was measured up to 1350 days of drying after a water-curing period of 7 days. The applicability of the different prediction models is discussed in the light of the measured shrinkage strains. The results showed that current shrinkage models were not adequate to predict the drying shrinkage of the tested concretes in this research. An appropriate methodology to carry out the updating of the models is suggested, and an updated model to the local conditions is proposed.

Keywords: Drying shrinkage, prediction model, portland cement, portland pozzolan cement, admixtures

1. Introducción

Predecir con certeza la deformación producida por retracción hidráulica es de suma importancia para que las estructuras se desempeñen en la forma en que fueron concebidas y no presenten problemas de durabilidad y serviciabilidad. Una estimación deficiente del valor de retracción puede ocasionar deflexiones excesivas y agrietamiento en estructuras de hormigón.

Pese al gran desarrollo que han presentado los modelos de predicción durante las últimas décadas, la predicción de la retracción hidráulica presenta una gran incertidumbre, principalmente por la variabilidad de los materiales constituyentes del hormigón, por la historia

de curado y condición ambiental de los elementos de hormigón una vez en servicio. Bazant et al., (1987) afirma que la retracción representa la más incierta propiedad del hormigón, cuya dispersión excede considerablemente la de la resistencia, trayendo como consecuencia que el diseño de estructuras por carga última deba estar basado en ensayos reales medidos a largo plazo para un hormigón en particular.

Sumado a lo anterior, existe el problema que el espacio de inferencia de los modelos propuestos en la literatura y los utilizados en los códigos de diseño, escapan a los hormigones utilizados en Chile, que en su

mayoría son fabricados con cementos mezclados, en particular con cementos Portland Puzolánicos. Además, actualmente se utilizan hormigones con algún tipo de aditivo, lo que no ha sido considerado en el desarrollo de los modelos de predicción de retracción hidráulica del hormigón, lo que implica que se presenten grandes diferencias entre los valores de retracción predichos respecto de los observados.

Por lo tanto, la solución al problema planteado pasa por contar con un método de predicción adecuado, basado en ensayos reales y actuales de largo plazo, que permita durante la etapa de diseño considerar de manera efectiva los efectos de la retracción hidráulica en una estructura.

2. Objetivo

El objetivo de la presente investigación fue desarrollar un procedimiento de predicción de la retracción hidráulica aplicable a hormigones chilenos para ser utilizado en la etapa de diseño de proyectos, para ello se consideró que la retracción hidráulica de hormigones nacionales puede ser modelada matemáticamente empleando las características de dosificación y las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.

3. Programa experimental

Se desarrolló un extenso programa experimental que consideró la fabricación de 82 hormigones con resistencias entre 20 y 45 MPa y con mediciones de retracción hasta los 1350 días de secado. Entre las variables analizadas se cuentan: áridos silíceos y calcáreos, tamaños máximos de áridos de 20 y 40 mm, cementos Portland y Portland puzolánicos corriente y de alta resistencia, cantidad de agua para producir asentamientos de cono de Abrams de 60 y 120 mm, y diferentes tipos y dosis de aditivos y adiciones. Entre estos últimos, el estudio incluyó aditivos reductores de agua, reductores de agua de alto rango, expansores, reductores de retracción, yeso, y disminución de la temperatura del hormigón reemplazando parte del agua de amasado por hielo. Además, se estudió la influencia del tamaño de probeta en la velocidad y magnitud de la retracción hidráulica para lo que se usaron 2 razones Volumen/Superficie; 16.6 y 22.7 mm.

Una serie de ensayos fueron realizados a cada hormigón. A los hormigones en estado fresco se realizó los siguientes ensayos: asentamiento de cono de Abrams (ASTM C 143 – NCh 1019), densidad del hormigón fresco (ASTM C 138 – NCh 1564) y medición de las temperaturas

ambiente y del hormigón.

En hormigón endurecido los ensayos de resistencia fueron realizados utilizando una prensa TONIPAC 3000 (ASTM C 39- NCh 1037), realizándose ensayos de compresión a 6 probetas cilíndricas a los 7, 28 y 90 días y 2 probetas cúbicas a 28 días. Además, se realizó ensayos de tracción por hendimiento (ASTM C 496 – NCh 1170) a las edades de 7, 28 y 90 días. También se llevó a cabo ensayos de Módulo de elasticidad (ASTM C 469) a las edades de 7, 28 y 90 días. Para cada edad de ensayo se utilizó dos probetas.

Finalmente, los ensayos de retracción hidráulica fueron realizados de acuerdo a ASTM C 157 y C 490 (NCh 2221). Seis probetas prismáticas fueron fabricadas para cada hormigón, tres de 75x75x285 mm y tres de 100x100x500 mm, a las cuales se les determinó la retracción hidráulica hasta los 1350 días de secado y se les midió la pérdida de peso a las mismas edades de ensayo. Las probetas fueron secadas en una sala acondicionada. Los rangos de temperatura y humedad relativa fueron 23 ± 2 °C y 50 ± 4 %, respectivamente (Aguilar, 2005)

4. Desarrollo de un modelo de predicción de la retracción hidráulica de hormigones

4.1 Estimación de la retracción hidráulica utilizando modelos de predicción y su comparación y evaluación con los resultados medidos

Del análisis bibliográfico se desprende que los métodos propuestos para predecir la retracción del hormigón reconocen la influencia de los componentes del hormigón con distintos grados de sofisticación, pero ninguno de los modelos estudiados posee amplios rangos de la razones áridos / cemento y/o W/C, diferentes tipos de áridos o aditivos.

Los resultados de retracción fueron comparados con las estimaciones de los modelos de predicción propuestos por el ACI 209, CEB MC 90, B3, GL 2000, Sakata 1993 y Sakata 2001.

Los valores calculados fueron obtenidos usando las dosificaciones y las propiedades de hormigón fresco y endurecido medidas en los hormigones fabricados. Se aclara que el coeficiente de ajuste por tipo de cemento se asumió igual a 1 para el modelo de Bazant (B3) y 10 para el modelo Sakata 2001. Para el modelo del CEB se utilizó un valor de 5 para cemento normal y de rápido endurecimiento. Para el modelo de Gardner, se consideró

un factor que se desprende del análisis de desarrollo de resistencia.

La comparación y evaluación de la estimación con los resultados medidos, permite evaluar la bondad de la predicción en base a datos reales. Para evaluar la bondad de los modelos se consideró un método gráfico complementado con un método estadístico. Estos métodos son:

- Comparación entre datos medidos y calculados: Este método consiste en comparar gráficamente los datos medidos versus los calculados por los diferentes modelos de predicción. Además, es posible calcular la tendencia que presentan los valores y su coeficiente de correlación. La gran ventaja de este método es que permite visualizar rápida y claramente el efecto que tiene un modelo sobre las estimaciones respecto de los valores medidos.
- Método del coeficiente de variación ponderado: Este método es una modificación al método del coeficiente de variación tradicional y fue propuesto por Bazant y Baweja (1995; 2000). La ventaja de este método es que permite asignar una ponderación a cada uno de los datos disponibles según la cantidad de mediciones realizadas, lo cual disminuye el error en el cálculo cuando se tiene excesiva cantidad de mediciones de corto plazo y muy pocas en el largo plazo.

La Figura 1 presenta el método gráfico de comparación y los coeficientes de variación ponderados entre los resultados de retracción estimados por los modelos ACI 209, CEB-FIP, B3, GL 2000, Sakata 1993 y Sakata 2001, con respecto a los medidos, mientras que la Figura 2 presenta los residuales respecto del tiempo de secado. Del análisis de estas figuras respecto del modelo ACI 209 se desprende claramente que la estimación del modelo no es correcta. El modelo subestima los valores de retracción obtenidos en hormigones chilenos. Por tanto, el valor propuesto para la retracción última debe ser modificado para lograr una mejor predicción con este modelo. Además, se aprecia que el modelo subestima la retracción en todo el tiempo de secado analizado, aumentando la diferencia a mayor tiempo. Lo anterior hace presumir que la curva de evolución propuesta es parcialmente incorrecta. Por último, los gráficos presentan una amplia dispersión de resultados. Luego, los factores ponderadores de este modelo deben ser modificados para lograr una mayor precisión en la estimación.

Respecto del Modelo CEB-FIP, se desprende que a edad temprana, el modelo en promedio sobrestima los

valores de retracción, ocurriendo lo contrario para el corto, mediano y largo plazo. Por tanto, con el objeto de mejorar la predicción con este modelo, la curva de evolución debe ser modificada. Por otro lado, al observar los valores obtenidos en el largo plazo, se hace evidente que el valor de retracción último propuesto por el modelo es inadecuado y depende del hormigón analizado, haciéndose indispensable modificar la ecuación del modelo para mejorar la estimación.

Al analizar los resultados del modelo propuesto por Bazant, se desprende que la estimación es correcta a edades tempranas de medición, condición que no se mantiene a mayores tiempos de secado. Luego, la ecuación de evolución propuesta es adecuada y debe ser ajustada para que refleje la realidad en el largo plazo.

Por otro lado, de la figura se desprende que la ecuación propuesta por el modelo para predecir el valor de la retracción última, no refleja el comportamiento real presentado en los hormigones analizados. Por tanto, la ecuación debe ser modificada para lograr una estimación adecuada.

Al estudiar la metodología propuesta por Gardner y Lockman en el 2001, respecto de los valores medidos se desprende que en promedio sobrestiman en el corto plazo y subestiman en el largo plazo, lo que hace dudar de la efectividad tanto de la ecuación de evolución como del valor último de retracción propuesto por el modelo. Sin embargo, al observar detenidamente la Figura 1, es posible distinguir tres zonas de estimación. La zona con mayor densidad de puntos corresponde a una subestimación de la retracción, mientras que la zona con menor densidad corresponde a una sobrestimación. Entre las dos zonas mencionadas, es posible observar una tercera zona con estimaciones de retracción apropiadas. Por tanto, se considera que para lograr estimaciones adecuadas, las ecuaciones de evolución y de valor último sólo deben ser calibradas.

El empleo del modelo propuesto por Sakata en 1993 produce una mejor predicción a lo mostrado por los modelos analizados anteriormente. Sin embargo, los parámetros ponderadores deben ser calibrados para ajustar la predicción y disminuir con ello aún más la dispersión de resultados. Se considera que la forma de las ecuaciones propuestas para la evolución y valor último de retracción son adecuadas y sólo deben ser calibradas a la realidad del país.

Al igual que el caso del modelo del año 1993, se estima que para el modelo de Sakata 2001 sólo se necesita una calibración de las ecuaciones para mejorar la predicción de la retracción hidráulica.

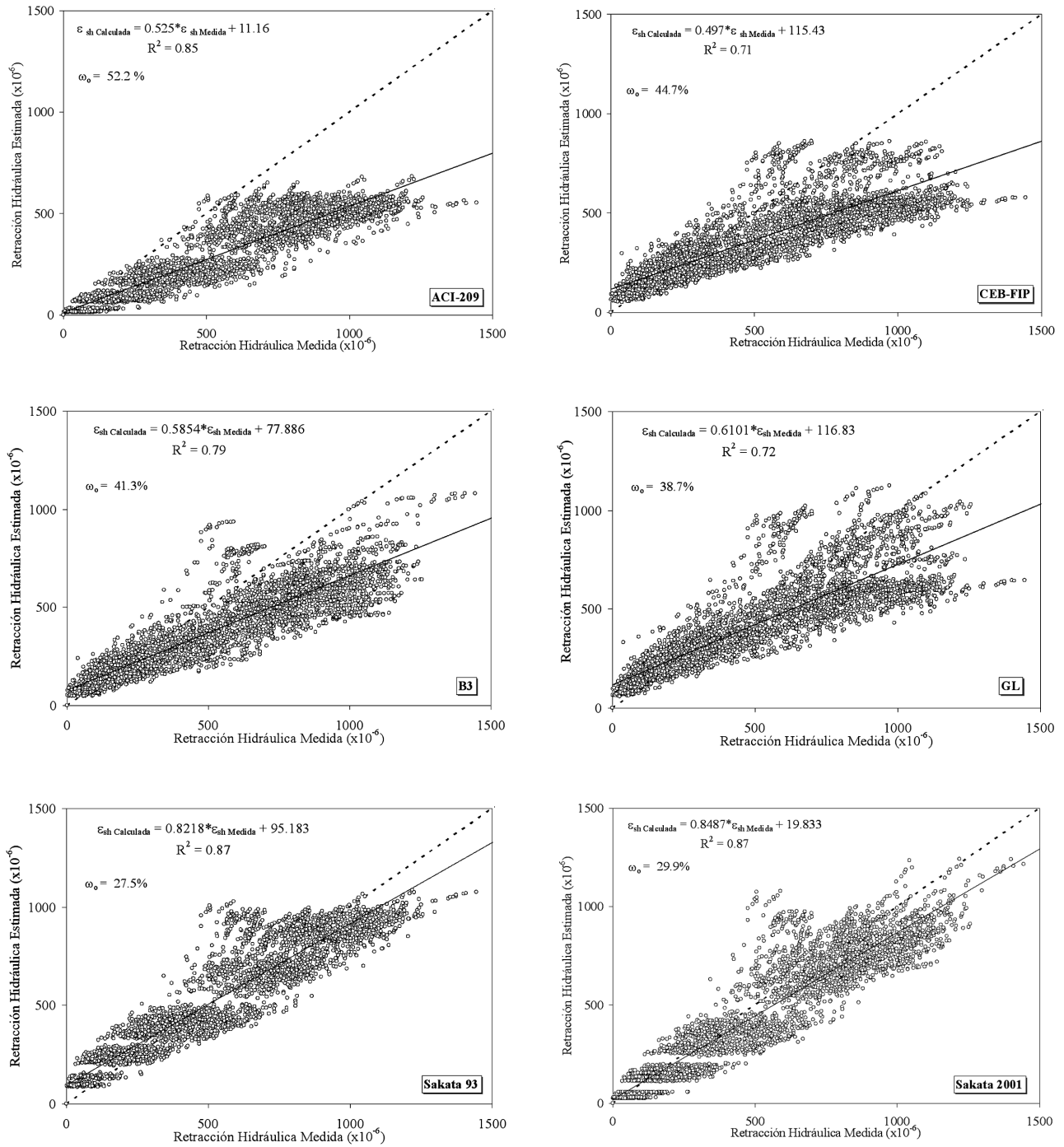


Figura 1. Comparación entre valores de retracción estimados por modelos de predicción respecto de los medidos

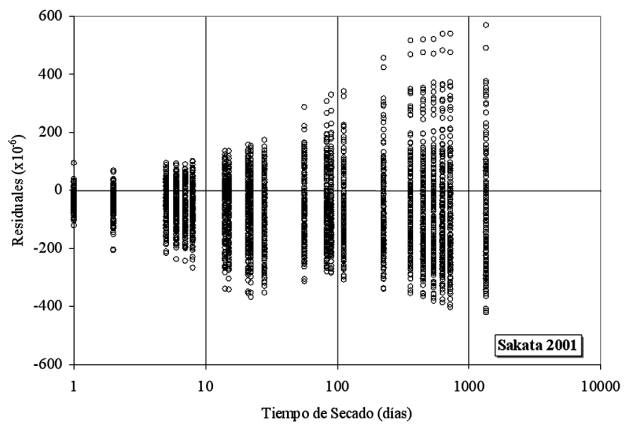
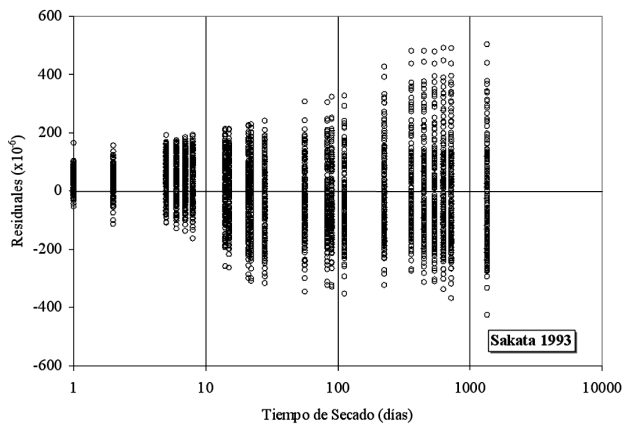
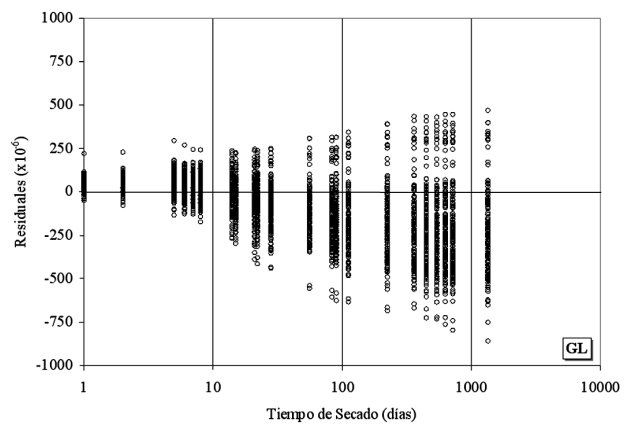
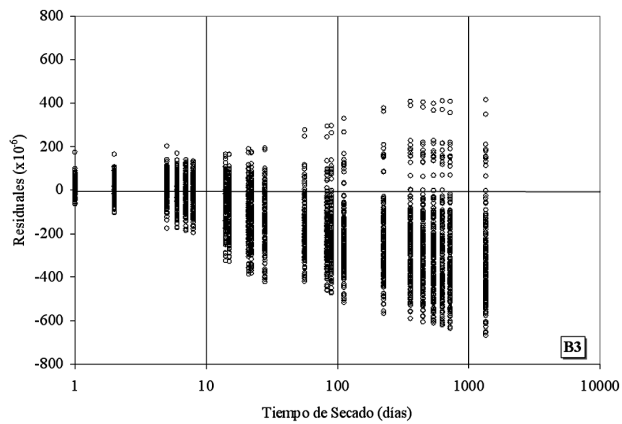
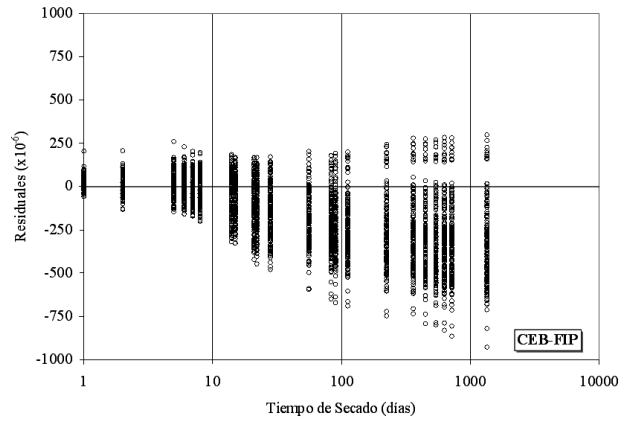
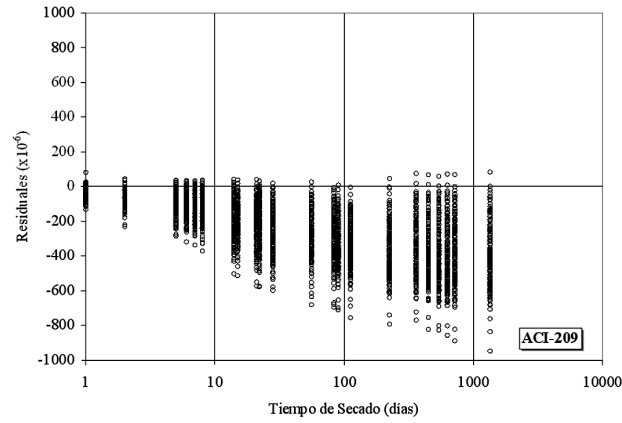


Figura 2. Residuales obtenidos entre los valores de retracción medidos y los estimados por los modelos de predicción respecto del tiempo de secado

Resumiendo, se destaca que prácticamente todos los modelos subestiman la retracción hidráulica observada en la presente investigación y no son precisos dado que poseen altos valores del coeficiente de variación ponderado. Particularmente, los modelos CEB MC 90, B3, GL 2000 sobrestiman en el corto plazo mientras que a mayor plazo subestiman los resultados de retracción, lo que claramente está asociado a la curva de evolución propuesta. Además, el modelo ACI 209 subestima todos los valores observados en la presente investigación. Por lo tanto, los modelos estudiados no representan el comportamiento de los hormigones fabricados con materiales disponibles y con aditivos. No obstante, la mejor estimación fue lograda con el modelo propuesto por Sakata.

4.2 Mejoramiento de modelos de predicción de retracción hidráulica propuestos en la literatura

De la sección anterior se concluye que los modelos utilizados actualmente para predecir la retracción hidráulica no reflejan cabalmente el comportamiento de los hormigones nacionales. Con el objeto de lograr una adecuada estimación de la retracción hidráulica de hormigones chilenos, esta sección presenta el mejoramiento de los modelos analizados en la etapa anterior. Este mejoramiento se hará en dos fases, la primera corresponderá a la calibración del modelo, para seguir con la segunda fase en donde se realiza una adaptación del modelo. Estas fases son aplicadas tanto a las ecuaciones de valor último de retracción como del submodelo de evolución de la retracción en el tiempo.

Por calibración se entenderá el cálculo de factores numéricos de corrección que actúen sobre las ecuaciones originales del modelo, de manera que los resultados estimados no sean significativamente diferentes con los obtenidos en el hormigón analizado (Masana, 2001). Por tanto, la calibración consiste en realizar alguna de las siguientes acciones:

- Introducir factores numéricos de calibración para ponderar alguna de las variables o para ponderar la estimación completa.
- Corregir la sensibilidad de las variables incluidas en el modelo, modificando los parámetros estadísticos que acompañan dichas variables.

El proceso de calibración se realizó con un programa estadístico (Statgraphics 4.1, Manugistics, 1998) y la bondad de la calibración es analizada con el coeficiente de variación ponderado o el coeficiente de error, dependiendo si la calibración es realizada en la ecuación de evolución de retracción o sobre la ecuación

del valor último de la retracción, propuestas por los modelos.

Por otro lado, la adaptación corresponde a la modificación de las ecuaciones del modelo. Para ello, se considera la significancia estadística mostrada por las variables independientes estudiadas, modificándose la ecuación que contiene la variable estadísticamente significativa. Al igual que en el caso de la calibración, la bondad de la modificación se traduce en los valores mostrados por el coeficiente de error y de variación ponderado.

4.2.1 Mejoramiento del valor último de retracción

El problema de la modelación de la retracción hidráulica se soluciona con una certera estimación del valor último, "este es el real problema a solucionar". Existe una relación entre la retracción hidráulica y la pérdida de peso (Videla y Aguilar, 2005; Aguilar C., 2005).

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = a \times \left(\frac{10^{wl(t, t_0)}}{b + 10^{wl(t, t_0)}} \right)^c \quad (1)$$

Donde $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ es la retracción por secado medida en el tiempo $(t - t_0)$ de secado, con t como la edad del hormigón y t_0 el tiempo cuando comienza el secado; $wl(t, t_0)$ es la pérdida de peso al tiempo $(t - t_0)$ medida directamente en el espécimen del ensayo de retracción y medida durante los mismos intervalos de tiempo; a , b y c son coeficientes que dependen fuertemente de cada serie de hormigón en particular.

Por lo tanto, para estimar de manera certera el valor de la retracción última, se debe medir la pérdida de peso en horno a 0% de humedad relativa (H.R.), luego obtener la pérdida de peso última a 50% de H.R. considerando que es igual a 0.867 de la pérdida de peso en horno (Aguilar, 2005), calibrar la relación entre retracción y pérdida de peso con los valores medidos de cada serie de hormigón, y reemplazar el valor de la pérdida de peso última en dicha relación.

Cabe destacar que los valores de retracción últimos obtenidos corresponden a una H.R. del 50%. Por tanto, al realizar las comparaciones con los resultados de los modelos en estudio, las ecuaciones propuestas deben considerar la modificación para la H.R. mencionada.

La Figura 3 presenta una comparación gráfica entre los valores de retracción últimos estimados con modelos de predicción y los calculados con la

metodología descrita anteriormente. Además, se incluye el coeficiente de error para cada modelo considerado.

Del análisis de esta figura se desprende que en su gran mayoría los modelos subestiman los valores de retracción experimentados por los hormigones fabricados con materias primas nacionales. En particular, este comportamiento se observa en los modelos del ACI 209, CEB-FIP y B3. El modelo propuesto por Gardner presenta algunas mejoras comparado con los resultados de los modelos mencionados, sin embargo son insuficientes dado su alto coeficiente de error, 45.6%. Por otro lado, se destaca que los modelos propuestos por Sakata presentan valores de retracción última adecuados, lo que se refleja en su bajo coeficiente de error, 15.1% y 20.1%, para los modelos de 1993 y del 2001, respectivamente. No obstante, se advierte un comportamiento insensible en el modelo de 1993, donde se observa un valor similar de retracción última estimada con el modelo para distintos valores calculados con la metodología descrita anteriormente, lo que no se presenta en el modelo del 2001.

Por tanto, para predecir con certeza la retracción hidráulica se procede con una calibración, separados por comportamiento significativo.

a) Calibración de las ecuaciones de valor último de retracción de los modelos de predicción

El proceso de calibración se realizó en dos etapas. La primera de ellas consistió en una calibración global, es decir, se determinó un factor ponderador que multiplicado por la ecuación de valor último modificada por la ecuación de H.R. de cada modelo, resulte en un valor lo más aproximado al experimental.

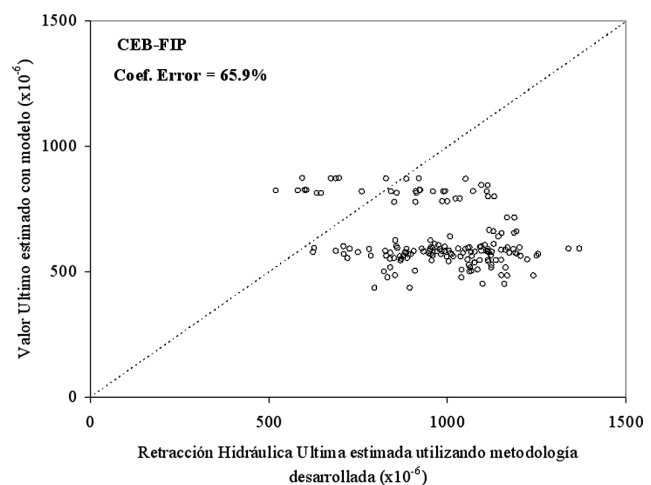
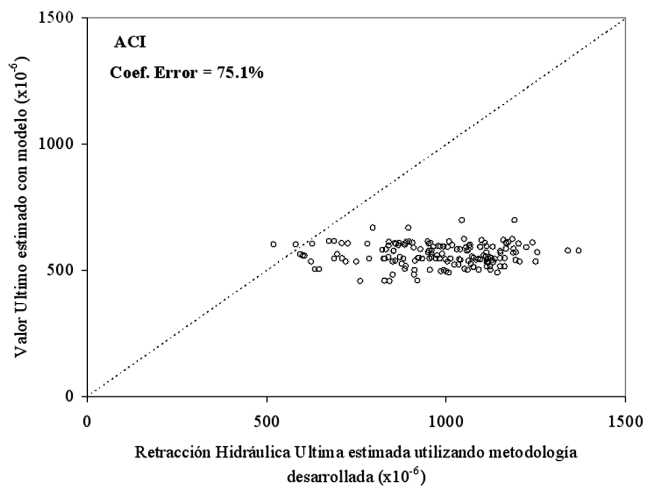
Posteriormente, al modelo que presentó el menor coeficiente de error se le realizó una calibración a cada parámetro numérico asociado a las variables independientes analizadas en la presente investigación.

Se destaca que los procesos de calibración fueron realizados mediante un proceso de regresión no lineal, en el cual se buscó minimizar los errores cuadráticos utilizando la ponderación por década logarítmica de todos los resultados.

La Tabla 1 presenta los resultados de la calibración global expresada en los ponderadores asociados a cada modelo y separados por comportamiento estadístico significativo, es decir, por tipo de cemento, de aditivo y/o adición. Además, se presenta el coeficiente de error mostrado por cada modelo.

Del análisis de esta tabla se desprende que los valores de los factores ponderadores son mayores que 1,

lo que significa que los modelos subestiman los valores de retracción experimentados por los hormigones nacionales, tal como se mostró en la sección anterior. Por otro lado, se observa que en promedio los factores de hormigones con aditivo son mayores a los sin aditivo, lo que hace suponer que los modelos en su gran mayoría representan el comportamiento de hormigones sin aditivo. Además, se observa que hormigones sin aditivo y con cemento Portland Puzolánico (PP) presentan los mayores valores del factor ponderador, lo que significaría que los modelos no han sido desarrollados para hormigones de estas características y más bien llevados a cabo considerando cemento del tipo Portland (P).



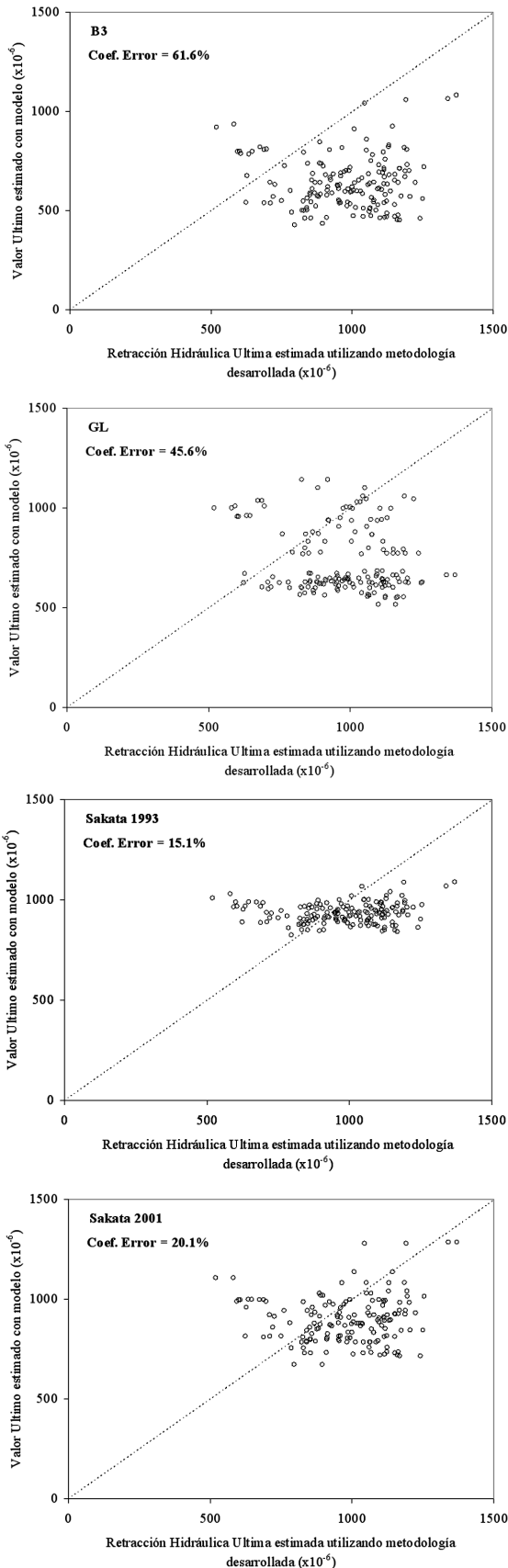


Figura 3. Comparación entre valores de retracción última calculados por metodología desarrollada y estimados por modelos de predicción

Por otra parte, se observa que la calibración global de los modelos se tradujo en una disminución importante de los coeficientes de error, destacando la disminución de los coeficientes asociados a los modelos del ACI 209, CEB-FIP y B3, siendo de segundo orden en el modelo GL y marginal en los modelos propuestos por Sakata.

De la Tabla 1 se desprende que el modelo Sakata 1993 calibrado presenta el menor coeficiente de error. Por tanto, se le realizó una calibración secundaria, con el objeto de mejorar la sensibilidad del modelo ante las variables independientes analizadas en la investigación. Luego, el modelo a calibrar es:

$$\varepsilon_{sh,c,m} = a + 780 \times [1 - \exp(0.01 \times H.R.)] + b \times \ln(W) + c \times \left[\ln\left(\frac{V}{S}\right) \right]^2 + 44 \times \ln(t_0) \quad (2)$$

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 2.

Del análisis de los resultados mostrados en la Tabla 2, se puede concluir que la mejora en la precisión de la estimación es marginal, dado la insignificante diferencia entre los coeficientes de error del modelo con calibración global y particular.

Por último, se destaca que el modelo de Sakata 1993 calibrado será el modelo a comparar con el obtenido en la etapa de adaptación.

El resultado de la adaptación de las ecuaciones de valor último de retracción de los modelos de predicción arrojó un mayor coeficiente de error que la calibración desarrollada anteriormente, 15.57% (Aguilar, 2005)

4.2.2 Mejoramiento de la ecuación de evolución de la retracción hidráulica

El mejoramiento de la ecuación de evolución considera una calibración de la misma. Esta calibración se realiza comparando los valores propuestos por los modelos con los resultados normalizados de retracción hasta los 1350 días de secado.

La normalización es un concepto desarrollado en Masana (2001) y consiste esencialmente en que cada resultado de retracción de una serie de hormigón es dividido por la última medición realizada, obteniéndose una curva de evolución la cual es comparada con las curvas propuestas por los modelos.

No obstante, dado que se cuenta con una muy buena estimación del valor último de retracción, al utilizar la relación entre la pérdida de peso y la retracción hidráulica, se ha considerado para efectos de normalización, utilizar los resultados de valor último estimados mediante la metodología descrita, obteniéndose las curvas de evolución de cada serie de hormigón

estudiada.

Estas curvas son comparadas con las ecuaciones propuestas por los modelos de predicción. La Tabla 3 presenta los resultados de esta comparación a través del coeficiente de variación ponderado, separado por modelo de predicción y comportamiento de hormigón. Del análisis de esta tabla, se observa que los modelos CEB-FIP, B3 y GL, presentan mayores coeficientes de variación comparados con los obtenidos por los modelos del ACI y los propuestos por Sakata. Una de las posibles explicaciones de esta diferencia estaría en el exponente

de la ecuación de evolución de los modelos CEB-FIP, B3 y GL, el cual de acuerdo a la teoría de la difusión de gases y lo establecido por Bazant desde 1991, debería corresponder a un valor de 0.5. No obstante y dado los resultados de la presente investigación, lo anterior no se cumpliría en la realidad experimental, probablemente debido a los mecanismos denominados aparentes.

Por lo tanto, para predecir con certeza la retracción hidráulica se procede con una calibración de las ecuaciones de evolución de retracción, separados por comportamiento significativo.

Tabla 1. Valores del factor ponderador obtenido de la calibración global de la ecuación última de los modelos estudiados y del coeficiente de error asociado, considerando hormigones con distintos comportamientos

Hormigones considerados en Análisis	Modelos de Predicción de Retracción					
	ACI	CEB-FIP	B3	GL	SAK 1993	SAK 2001
Todos	1.749	1.625	1.585	1.396	1.0499	1.108
Sin Aditivo	1.789	1.379	1.335	1.258	1.011	1.014
Sin Aditivo – Cemento P	1.621	1.0763	1.251	1.207	0.913	0.951
Sin Aditivo – Cemento PP	1.972	1.887	1.444	1.553	1.128	1.075
Sin Aditivo – Cemento PPF	1.774	1.173	1.311	1.014	0.993	1.015
Con Aditivo o Adición	1.726	1.769	1.731	1.478	1.073	1.164
Con Aditivo WR – HWR	1.798	1.900	1.911	1.401	1.133	1.262
Con Aditivo E	1.929	1.984	1.892	1.700	1.183	1.277
Con Aditivo SR	1.525	1.528	1.487	1.423	0.951	1.014
Con Hielo	1.713	1.598	1.523	1.018	0.967	1.015
Con Yeso	2.029	1.725	1.566	1.518	1.144	1.139
Coefficiente de Error de Modelos (%)	75.13	65.87	61.61	45.58	15.08	20.12
Coefficiente de Error de Modelos Calibrados (%)	12.58	13.04	16.77	19.28	11.63	14.22

P: Cemento Portland
 PP: Cemento Portland Puzolánico
 PPF: Cemento Portland Puzolánico Fino
 WR: Aditivo Reductor de Agua
 HWR: Aditivo Reductor de Agua de alto rango
 E: Aditivo Expansor
 SR: Aditivo Reductor de retracción

Tabla 2. Factores de calibración de la ecuación de valor último del modelo Sakata 1993

Hormigones considerados en Análisis	Constantes Calibradas		
	a	b	c
Todos	-591.1	385.5	-49.64
Sin Aditivo	-593.0	379.1	-50.1
Sin Aditivo – Cemento P	-590.3	360.5	-51.6
Sin Aditivo – Cemento PP	-598.2	401.7	-48.1
Sin Aditivo – Cemento PPF	-590.4	375.2	-50.5
Con Aditivo o Adición	-590.0	389.2	-49.4
Con Aditivo WR – HWR	-589.8	399.6	-48.5
Con Aditivo E	-590.1	408.3	-47.5
Con Aditivo SR	-590.1	368.1	-51.5
Con Hielo	-590.2	370.9	-51.2
Con Yeso	-590.5	402.2	-47.2
Coefficiente de Error del Modelo (%)	11.62		

Tabla 3. Coeficiente de variación ponderado de curvas de evolución de retracción, estimadas versus medidas, separadas por hormigones con distintos comportamientos (%)

Hormigones considerados en Análisis	Modelos de Predicción de Retracción					
	ACI	CEB-FIP	B3	GL	SAK 1993	SAK 2001
Todos	14.6	22.6	21.2	21.3	16.2	15.3
Sin Aditivo	16.2	17.3	15.4	16.4	14.9	17.1
Sin Aditivo – Cemento P	13.8	18.9	16.5	17.7	14.5	13.9
Sin Aditivo – Cemento PP	16.2	18.1	16.5	17.1	15.7	18.4
Sin Aditivo – Cemento PPF	18.1	16.7	15.2	16.0	15.3	17.8
Con Aditivo o Adición	13.7	25.5	24.3	24.1	17.2	14.3
Con Aditivo WR – HWR	16.1	14.2	14.5	13.4	10.3	13.2
Con Aditivo E	12.7	23.5	23.0	22.0	16.3	14.5
Con Aditivo SR	11.9	33.3	31.1	31.6	21.9	15.1
Con Hielo	8.7	15.3	14.7	14.0	14.5	8.1
Con Yeso	19.0	33.0	29.5	31.3	31.8	18.1

a) Calibración de las ecuaciones de evolución de retracción de los modelos de predicción

Al analizar las ecuaciones de evolución de los modelos de predicción de retracción, se observa que corresponden a las siguientes tres curvas genéricas:

$$f(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{a \times \left(\frac{V}{S}\right)^b + (t - t_0)} \right]^c \quad (3)$$

$$f(t, t_0) = \tanh \left[\left(\frac{t - t_0}{a \times t_0^b \times f_{sp}^c \times \left(\frac{V}{S}\right)^d} \right)^e \right] \quad (4)$$

$$f(t, t_0) = 1 - \exp(a \times (t - t_0)^b) \quad (5)$$

Donde a, b, c, d y e, son constantes que dependen de cada serie de hormigón en particular.

Se descartó del estudio la ecuación de evolución 5, por no contener la variable V/S explícita. Los resultados de la calibración y el coeficiente de variación ponderado, se presentan en la Tabla 4 para cada una de las ecuaciones de evolución analizadas.

Del análisis de esta tabla se concluye que la calibración de la ecuación de evolución 3 presenta el menor coeficiente de variación ponderado respecto de los valores experimentales normalizados. Además, contrario a lo afirmado por algunos investigadores que se basaron en la teoría de difusión (Bazant y Baweja, 2000; Gardner y Lockman, 2001), se observa que la potencia a la cual está elevada la ecuación es cercana a la unidad. Se destaca que al fijar el exponente de la ecuación en 1.0, el coeficiente de variación ponderado corresponde a 15.5%.

4.3 Validación del modelo de predicción propuesto

El modelo de predicción propuesto en la presente investigación corresponde al encontrado en la etapa de mejoramiento de modelos, es decir, equivale al producto del submodelo calibrado de valor último de retracción propuesto Sakata en 1993, con el submodelo de evolución de retracción calibrado de la ecuación 3, el que se resume en la ecuación 6 y en la Tabla 5, a saber:

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \left[a + 780 \times \left[1 - \exp\left(\frac{H.R.}{100}\right) \right] + b \times \ln(W) + c \times \left[\ln\left(\frac{V}{S}\right) \right]^2 + 44 \times \ln(t_0) \right] \times \left[\frac{t - t_0}{a \times \left(\frac{V}{S}\right)^b + (t - t_0)} \right]^c \quad (6)$$

Tabla 4. Factores de calibración de las ecuaciones genéricas de evolución de la retracción hidráulica y coeficiente de variación ponderado resultante

Hormigones considerados en Análisis	Ecuación de Evolución de Retracción Hidráulica							
	$f(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{a \times (V/S)^b + (t - t_0)} \right]^c$			$f(t, t_0) = \tanh \left[\left(\frac{t - t_0}{a \times t_0^d \times f_{gt}^c \times (V/S)^e} \right)^e \right]$				
	a	b	c	a	b	c	d	e
Todos	1.997	0.976	0.913	0.356	-0.021	-0.140	2.089	0.537
Sin Aditivo	1.977	0.852	1.039	0.336	-0.037	-0.171	2.065	0.569
Sin Aditivo – Cemento P	1.989	0.926	0.919	0.352	-0.032	-0.161	2.073	0.569
Sin Aditivo – Cemento PP	1.978	0.865	0.994	0.338	-0.035	-0.168	2.069	0.552
Sin Aditivo – Cemento PPF	1.964	0.764	1.204	0.317	-0.045	-0.185	2.053	0.586
Con Aditivo o Adición	2.009	1.049	0.839	0.367	-0.012	-0.121	2.102	0.519
Con Aditivo WR – HWR	2.002	1.004	0.721	0.333	-0.025	-0.143	2.083	0.474
Con Aditivo E	2.032	1.185	0.681	0.383	-0.002	-0.100	2.118	0.478
Con Aditivo SR	2.002	1.008	1.034	0.388	-0.007	-0.114	2.110	0.585
Con Hielo	2.003	1.012	0.789	0.349	-0.029	-0.153	2.082	0.502
Con Yeso	2.008	1.048	0.970	0.396	-0.005	-0.123	2.121	0.510
ω_0 de Modelo Calibrado(%)	11.4			14.2				

Tabla 5. Factores de calibración de modelo de predicción de retracción hidráulica propuesto

Hormigones considerados en Análisis	Factores de Calibración					
	a	b	c	d	e	f
Todos	-591.1	385.5	-49.64	1.997	0.976	0.913
Sin Aditivo	-593.0	379.1	-50.1	1.977	0.852	1.039
Sin Aditivo – Cemento P	-590.3	360.5	-51.6	1.989	0.926	0.919
Sin Aditivo – Cemento PP	-598.2	401.7	-48.1	1.978	0.865	0.994
Sin Aditivo – Cemento PPF	-590.4	375.2	-50.5	1.964	0.764	1.204
Con Aditivo o Adición	-590.0	389.2	-49.4	2.009	1.049	0.839
Con Aditivo WR – HWR	-589.8	399.6	-48.5	2.002	1.004	0.721
Con Aditivo E	-590.1	408.3	-47.5	2.032	1.185	0.681
Con Aditivo SR	-590.1	368.1	-51.5	2.002	1.008	1.034
Con Hielo	-590.2	370.9	-51.2	2.003	1.012	0.789
Con Yeso	-590.5	402.2	-47.2	2.008	1.048	0.970

4.3.1 Comparación entre los resultados estimados con el modelo propuesto y resultados experimentales

La estimación de resultados de retracción utilizando el modelo propuesto, denominado Videla – Aguilar 2004 (VA 2004), se muestra en la Figura 4 comparado con los resultados experimentales del presente estudio. Además, la Tabla 6 muestra los coeficientes de variación ponderado de los modelos de predicción analizados y del modelo propuesto.

Del análisis de la figura se desprende que la curva de evolución es adecuada, ya que los resultados se aglomeran en torno a la línea de tendencia central, lo que se refleja además en la pendiente cercana a la unidad de la ecuación que engloba los resultados promedios (0.9486).

Por otro lado, al analizar los resultados de la

Tabla 6, se observa que el modelo propuesto presenta una mejor estimación de la retracción hidráulica respecto de los modelos propuestos por la literatura, al poseer un menor valor del coeficiente de variación ponderado.

Al analizar los resultados del modelo propuesto VA 2004, destaca el hecho que el modelo presenta una mejor estimación de hormigones con aditivos que de hormigones sin aditivo. Por tanto, el modelo puede ser utilizado sin ningún inconveniente en hormigones fabricados en la actualidad con cemento del tipo PP y aditivos o adiciones.

Particularmente, presenta un ω_0 de 15.5% en hormigones fabricados con WR o HWR, lo que se considera como un modelo de predicción excelente (Gardner y Lockman, 2001).

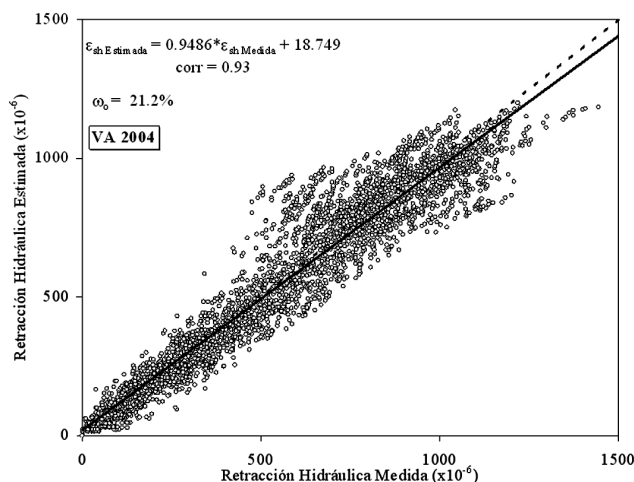


Figura 3. Comparación de resultados estimado por el modelo propuesto y resultados experimentales

Tabla 6. Valores del coeficiente de variación ponderado obtenidos por diferentes modelos de predicción propuestos en la literatura y el desarrollado en la presente investigación

Hormigones considerados en Análisis	Modelos de Predicción de Retracción						
	ACI	CEB-FIP	B3	GL	SAK 1993	SAK 2001	VA 2004
Todos	52.2	44.7	41.3	38.7	27.5	29.9	21.2
Sin Aditivo	56.5	40.2	36.3	42.7	31.0	34.0	27.1
Sin Aditivo – Cemento P	51.0	29.4	36.6	46.3	35.2	36.6	30.0
Sin Aditivo – Cemento PP	62.0	52.4	35.8	43.8	20.1	24.3	18.4
Sin Aditivo – Cemento PPF	57.9	28.1	32.9	35.5	24.4	28.5	26.0
Con Aditivo o Adición	50.3	47.8	44.6	36.7	25.6	27.7	17.1
Con Aditivo WR – HWR	56.0	53.4	52.5	34.3	19.3	31.5	15.5
Con Aditivo E	56.3	52.7	47.3	43.4	15.7	26.3	13.2
Con Aditivo SR	40.2	38.5	34.1	34.3	34.1	24.8	20.3
Con Hielo	48.7	40.1	34.2	12.8	18.1	8.0	8.2
Con Yeso	56.5	43.5	34.4	35.3	20.0	12.9	16.1

5. Conclusiones

Los resultados de retracción fueron comparados con las estimaciones de los modelos de predicción propuestos por el ACI 209, CEB MC 90, B3, GL 2000, Sakata 1993 y Sakata 2001.

Los valores calculados fueron obtenidos usando las dosificaciones y las propiedades de hormigón fresco y endurecido medidas en los hormigones fabricados.

Se destaca que prácticamente todos los modelos subestiman la retracción hidráulica observada en la etapa experimental y no son precisos dado que poseen altos valores del coeficiente de variación ponderado. Particularmente, los modelos CEB MC 90, B3, GL 2000 sobrestiman en el corto plazo mientras que a mayor plazo subestiman los resultados de retracción, lo que claramente está asociado a la curva de evolución propuesta. Además, el modelo ACI 209 subestima todos los valores observados en la presente investigación. Por lo tanto, los modelos estudiados no representan el comportamiento de los hormigones fabricados con materiales disponibles y con aditivos. No obstante, la mejor estimación fue lograda con el modelo propuesto por Sakata 1993.

Se desarrolló un proceso de calibración y/o adaptación de los modelos de predicción a las condiciones locales.

Basado en los resultados obtenidos, un modelo de predicción de retracción fue desarrollado para ser utilizado en hormigones con características similares a los analizados en la presente investigación. Este modelo requiere de variables que pueden ser fácilmente supuestas en la etapa de diseño considerando la dosificación del hormigón o simplemente la experiencia del diseñador. Este modelo consiste en una función de evolución calibrada del ACI y un valor último que corresponde a la ecuación propuesta por Sakata (1993) calibrada basándose en la relación retracción hidráulica – pérdida de peso. El modelo resultó ser exitoso al predecir con bastante certeza la retracción hidráulica de los hormigones estudiados.

Finalmente, la forma general del modelo propuesto para ser utilizado en la fase de diseño de proyectos aplicable a la realidad nacional corresponde a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \left[-591 + 780 \times \left[1 - \exp\left(\frac{H.R.}{100}\right) \right] + 386 \times \ln(W) - 49 \times \left[\ln\left(\frac{V}{S}\right) \right]^2 + 44 \times \ln(t_0) \right] \times \left[\frac{t - t_0}{2 \times \left(\frac{V}{S}\right)^{0.36} + t - t_0} \right]^{0.91}$$

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico de Chile por el financiamiento dado a este estudio bajo el proyecto Fondecyt N° 1980943-1998.

7. Referencias

- ACI 209 (1997), Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209 R97, Detroit.
- AGUILAR C. (2005), Estudio del Comportamiento y Desarrollo de una Metodología de Predicción de la Retracción Hidráulica de Hormigones. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, pp. 550.
- BAZANT Z., WITTMAN F y KIM J. (1987), Statistical Extrapolation of Shrinkage Data. Part II: Bayesian Updating, ACI Materials Journal, N° 84, Vol 2, pp 83-91.
- BAZANT Z. y BAWEJA S (1995), Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3, Materials and Structures, N° 28, pp 357-365.
- BAZANT Z.P. y BAWEJA S. (2000), Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3, The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage – Structural Design Effects, SP-194, American Concrete Institute, pp. 1-83
- CEB-FIP MC90 (1990), Código modelo para Hormigón Estructural, Thomas Telford, London, 1991.
- GARDNER N.J. y LOCKMAN M.J. (2001), Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete, ACI Materials Journal, V.98, N°2, pp. 159-167.
- KUTTNER C.H. (1997), Creep and Shrinkage for Windows the Program for the RILEM Databank, Karlsruhe University, Version 1.0, Weimar, Berlin and Karlsruhe, Germany.
- MANUGISTICS Inc. (1998), Statgraphics Plus for Windows Standard Version, User Manual.
- MASANA C. (2001), Desarrollo de un procedimiento para la predicción de la retracción hidráulica en hormigones fabricados con cementos chilenos, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, p.430.
- SAKATA K (1993), Prediction of Concrete Creep and Shrinkage, Proceedings of 5th International RILEM Symposium (Concreep5), Barcelona, Spain, pp 649-654.

SAKATA K., TSUBAKIT., INOUE S. y AYANO T. (2001), Prediction Equations of Creep and Drying Shrinkage for Wide-Ranged Strength Concrete, Proc. of 6th International Conference CONCREEP-6@MIT, pp. 753-758.

VIDELA C. y AGUILAR C. Retracción por Secado de Hormigones con cemento Pórtland Puzolánico y Aditivos Reductores de Retracción. Materiales de Construcción, Vol. 55, N° 278, 2005, pp. 13 – 28.



Indice Palabras Clave

Keywords Index

A	
Absorción de agua	91
Acero	129
Aditivos	139
Ambiente	129
C	
Cáscara de arroz	91
Cemento Portland	139
Cemento Portland Puzolánico	139
Corrosión	129
Creep	117
Cuantía mínima de cortante	103
D	
Ductilidad de vigas	103
Durabilidad	129
G	
Grado de hidratación	117
H	
Hormigón	129
Hormigón de alta resistencia	103
M	
Microestructura	117
Modelos de predicción	139
P	
Propiedades mecánicas	117
R	
Residuo agroindustrial	91
Resistencia a la compresión	117
Retracción	139
Retracción hidráulica	
S	
Suelo-cemento ladrillos	91

A	
Admixtures	139
Agricultural residue	91
B	
Beam ductility	103
C	
Carbon steel.....	129
Concrete	129
Corrosion	129
Creep	117
D	
Degree of hydration.....	117
Drying shrinkage	139
Durability	129
E	
Environmental	129
H	
High strength concrete	103
M	
Mechanical properties	117
Mechanical strength.....	91
Microstructure	117
Minimum shear steel ratio	103
P	
Portland cement	139
Portland Pozzolan cement	139
Prediction model	139
R	
Rice husk utilization	91
S	
Shrinkage	117
Soil-cement brick	91
W	
Water absorption	91

Guía para los autores

1. Envío de artículos

Los artículos deben estar en idioma español o inglés y ser originales y no publicados previamente o en proceso de publicación en otra revista. Se deben enviar dos copias impresas del artículo completo, incluyendo tablas y figuras y una versión completa en disquete en MS-Word para Windows 97 o superior, al Editor: Alfredo Serpell, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Edificio San Agustín, 3er. Piso, Santiago, Chile. Las copias y el disquete no serán devueltos a los autores. Deberá incluirse en el envío, la dirección completa de contacto de los autores así como su dirección de correo electrónico. El artículo será evaluado por expertos reconocidos en los temas de la revista. Se podrán requerir revisiones y correcciones antes que se tome una decisión sobre la aceptación o rechazo del artículo.

2. Formato de los artículos

El artículo deberá tener una extensión máxima de 8000 palabras, en papel tamaño carta y a espacio doble con un margen en el lado izquierdo de 3cm y de 2cm en los otros tres lados. La letra del texto debe ser Times New Roman 12. Los trabajos que no cumplan con el formato indicado, serán devueltos sin ser enviados al Comité Revisor.

2.1. Primera Página

Los artículos deberán tener una página de título con el nombre completo del o de los autores, su filiación y dirección completa para correspondencia, teléfono, fax y e-mail. El título y la filiación de los autores deben estar en castellano e inglés.

2.2. Resumen, abstract y palabras claves

El resumen no debe exceder las 250 palabras en su versión en español y debe resumir los aspectos claves del artículo y una síntesis de las aplicaciones y conclusiones más importantes que el artículo entrega. El abstract debe ser una traducción correcta del resumen al inglés. Se deben incluir cinco palabras claves tanto en español como en inglés.

2.3. Contenido del artículo

El artículo debe estar bien redactado y estructurado. La estructura del artículo debe incluir como mínimo las siguientes secciones: introducción, discusión y desarrollo, y conclusiones. La introducción debe establecer claramente el propósito del trabajo. La discusión y desarrollo deberá incluir los principales resultados y observaciones del trabajo, la metodología utilizada, etc. Las conclusiones deben ser relevantes para los lectores.

2.4. Referencias

Se usa el sistema Harvard para las referencias (www.ing.puc.cl/ric). Estas deben estar completas y correctas. En el texto, las referencias deben citarse como sigue: González (2001) o (Peralta y Molina, 1999). Para más de dos autores debe indicarse como (Martínez et al., 2000). Al final del artículo, las referencias deben agregarse en orden alfabético según el apellido del primer autor. Las referencias de un mismo autor de un mismo año deben diferenciarse usando 2000a, 2000b, etc. El estilo de las referencias debe seguir alguno de los esquemas siguientes: Loforte, F. (2001) El sistema BOT: el caso portugués, *Revista Ingeniería de Construcción*, 16(2), 76-84. Serpell, A. (2002) Administración de Operaciones de Construcción, Alfaomega, México. Videla, C., Aguilar, C. (2001) Effects of Mix Design Parameters on Drying Shrinkage of Concrete, 2nd International Conference on Engineering Materials. Volumen II, 99 – 110, San José, California, USA, August.

2.5. Tablas y Formulas

Las tablas y fórmulas (ecuaciones) deberán ser numeradas secuencialmente en el mismo orden en que aparecen en el texto, con números arábigos y haciendo referencia a ellas como: tabla 1, tabla 2..., fórmula 1, fórmula 2.... etc., según corresponda. Estas deben ser introducidas dentro del texto en el mismo orden en que son referenciadas. En el caso de las tablas, el título debe colocarse en la parte superior y no deben duplicar los resultados presentados en gráficos. El sistema de unidades a emplear será el Sistema Internacional (SI).

2.6. Figuras

Las figuras pueden incluir gráficos, esquemas, diagramas y fotografías. Las figuras deben enviarse en una condición lista para su publicación, con calidad de impresión láser. Si son fotografías, deben ser de alta calidad. Deben numerarse en forma secuencial, en el mismo orden en que son referenciadas en el texto como: figura 1, figura 2, etc., y su título deberá colocarse en la parte inferior. Deberán ser incluidas dentro del texto según sean citadas y además, deben ser enviadas en hojas separadas y en el disquete, en el software original en que fueron creadas.

3. Impresiones

Cada autor recibirá dos ejemplares de la Revista donde se publicó su artículo, además de una copia de su publicación en formato pdf.

4. Opiniones expresadas en los artículos

Las opiniones vertidas en los artículos publicados en la Revista son de exclusividad responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

5. Derechos de autor

El envío de un artículo a la Revista Ingeniería de Construcción implica que representa un trabajo original, no publicado previamente y no considerado para publicación en ninguna otra parte. Los autores deberán transferir el derecho de autor de sus artículos a la Editorial siempre y cuando el artículo sea aceptado para publicación, usando un formulario provisto por la Editorial. El derecho de autor cubre los derechos exclusivos para la reproducción y distribución del artículo, incluyendo re-impresiones, reproducciones fotográficas, microfilms, escaneo de documentos o cualquier reproducción de naturaleza similar así como traducciones. Permisos para usar figuras deben ser obtenidas por el autor en forma previa al envío del artículo.